

## X線顕微検査装置

## BACKGROUND OF THE INVENTION

## 1. Field of the invention

本発明はX線検査装置に関し、特に、高輝度電子流を放射する電子源を用いた超高分解能のX線顕微検査装置において、これまでにない高分解能CT (computerized tomography : X線断層撮影) 機能、蛍光X線を利用した元素分析機能、複数の金属ターゲットを備えて検査目的に応じてターゲットを選べるターゲット切替機能などの新しい機能を付加したX線顕微検査装置に関する。

## 2. Description of the Related Art

X線を利用した検査装置としては、X線顕微鏡、異物検査装置、蛍光X線分析装置などの各種の産業検査装置や、X線診断装置などの医療用X線装置が知られている。図1は、従来のX線検査装置の構成例を示している。本例でのX線検査装置は、電子源として熱電子放射陰極21bを用い、グリッド21aとアノード21cとの間に高電圧を印加することにより、電子源21bからの電子Reを加速後、電子レンズ22によりタングステンなどの高融点金属の薄板でできたターゲット23上に電子Reを集束させ、微小な点状X線源23aを得るようにしている。そして、X線源23aから発生する点状X線Rxを用いて試料(被検査体)10の内部を拡大投影し、試料内部の微細構造を非破壊で透視検査するというものである。

本出願人が開発し商品化している従来のX線顕微検査装置では、集束レンズ系にできるだけ球面収差と色収差の少ないレンズを用いた二段縮

小系と、熱電子源としてすぐれた性質をもつLaB<sub>6</sub>（六ほう化ランタン）カソードを採用し、さらに高感度のイメージ増強管を使用しており、分解能は1  $\mu$ mを切り、0.4  $\mu$ m程度に達している。この分解能は、実用的なX線検査装置としては世界的にみて現在最高の値（露光時間を無視すれば0.1  $\mu$ m程度までが最高の値）であるが、技術的に現状での限界と考えてよく、本発明で期待する0.1  $\mu$ mより良い分解能は、従来技術をもってしては不可能である（後述の非特許文献1～5の説明参照）。

一方、これら投影型のX線検査装置には、最近数社でマイクロCT機能が付加されるようになり、サンプル（試料）の任意の断面形状が観察できるため、その効用は非常に拡大した。しかしながら、現状でのCT像の分解能はもとの投影像のそれより数倍悪く、発展が阻まれている。これはCT像を得るのに必要な試料の回転における軸振れの技術的な制限と、試料をターゲットに近づけた状態で回転できないという本質的な制限によるものである。

在来、投影型のX線検査装置では像のコントラスト（つまり透過度の違い）から試料の種類を推定するのみで、元素分析の必要性は極めて大きかったが、それが行われたことはなかった。これは在来の元素分析用検出器を試料の下部に置くと、ターゲットからの直接のX線と試料からの特性X線（この場合、蛍光X線）とが重なって区別がつかないからである。また図1に示すように、試料10の上方には検出器を入れるスペースがそもそも無かったことにもよる。

試料によってはコントラストの付き方を変えて観察をすることが必要で、このため加速電圧とターゲットの種類を変えることが望ましい。加速電圧を変えることはよく行われることであるが、ターゲットを高真空

に保ったまま変えることは非常に難しく、大がかりな装置にならざるを得ないので今までのX線検査装置でオンラインで行われたことはない。

ここで、X線検査装置の分解能に係る従来の技術について説明する。

分解能に係る技術については、例えば非特許文献1～非特許文献5に開示されている。非特許文献1には、X線陰影顕微鏡に関し、従来、その分解能は $0.5\mu\text{m}$ が限界であったが、今回ターゲットに非常に薄い金属膜（厚さ $0.1\mu\text{m}$ ）を用いることにより、分解能 $0.1\mu\text{m}$ を達成したことが記載されている。また、一枚の画像を得るのに露光時間は5分であったことが記載されており、この非特許文献1の論文が開示された後、露光時間を短くするための研究などが盛んに行われるようになった。また、非特許文献2は、電子顕微鏡の照射系を利用した透過型X線陰影顕微鏡についての研究報告（東北大学科学計測研究所報告）で、分解能 $0.1\mu\text{m}$ を達成したことが記載されてる。また、分解能に影響を与える各要因について理論的分析を行い、X線源のスポットサイズが分解能に一番影響を与えるという結論を導き出している。また、SEM（走査電子顕微鏡）であることを利用して、焦点合わせに偏向コイルで電子ビームを振ることを利用していることが記載されている。

また、非特許文献3は、今日までのX線顕微鏡の流れを解説したものであり、特に生物試料の観察に言及して、比較的波長の短い（ $1\sim 100\text{\AA}$ ）軟X線顕微鏡について解説している。非特許文献4は、非特許文献2の内容とほぼ同じであるが、 $0.1\mu\text{m}$ の分解能の根拠になる波形が示されている（本文p. 146）。非特許文献5は、X線顕微鏡についてわかりやすく解説されており、装置は非特許文献2, 3, 4と同じで、コントラストが付きづらい試料に対してターゲットを変えることにより、像質が良くなることが示されている。

[ 発明が解決しようとする課題 ]

現在の半導体技術は微細化の一途をたどっており、 $0.1\mu\text{m}$ 程度の分解能のX線顕微装置は近い将来必須のものとなると予想される。ナノテクノロジーの分野は情報、医療、環境にわたるが、例えば、医療で言われているマイクロマシンにおいては、それを構成する部品が $1\mu\text{m}$ を切り、ナノのオーダーに入ろうとしている。また、現在の半導体技術は微細化の一途をたどっており、これまでにない微小X線源を用いて分解能 $0.1\mu\text{m}$ 以下クラスでの非破壊検査が是非とも必要な課題となっている。特に情報分野では次世代超LSIの線幅を現在の $180\sim130\text{nm}$ から $70\sim100\text{nm}$ にしようという大きな課題がある。同時に、軽元素を主体とした微細構造が観察対象となるケースが多く、像にコントラストをつけるため、在来のX線検査装置では困難であった $10\sim20\text{kV}$ の低加速電圧による長波長のX線を用いても高分解能を保持することが重要な課題となっている。それと同時に、これまでにない多くの新しい機能が望まれよう。

これまでにない高分解能をもつX線検査装置を製作するためには、より高輝度（単位面積／単位立体角あたりの電流量が多く）且つ放射電流量が多い電子源が必要になってくる。また、できるだけ多くの電子プローブ電流量を確保する電子レンズ系も必要になってくる。さらに、こうした高電流密度をもつ電子プローブが衝突しても融けたり蒸発しない様、ターゲットの放熱効果を大きくする工夫が必要になってくる。

また、超高分解能（ここでは、 $0.1\mu\text{m}$ 以下の分解能を言う）をもつX線検査装置において実用化が望まれる新機能の第1は、電子プローブのX線発生用ターゲット（X線源）に対するピント調整、電子プロー

ブの非点収差補正などの調整を画像を見ながら容易に行うことが可能な機能（以下、焦点調整機能と言う）である。また、第２は、被検査体の所望の部位の検査やターゲットの切替えを可能とするために、電子プローブをターゲット面上で自由に振って当該X線により被検査体を走査可能とする機能（以下、電子プローブ制御機能と言う）である。第３は、X線発生用ターゲットに当てる電子線の軸合わせを容易に行うことが可能な電子線軸合わせ機能である。第４は、高分解能かつ高速のCT機能である。第５は、透視像の所望の部分の元素を分析する元素分析機能である。これには蛍光X線による元素分析を利用するが、そのためのX線ターゲットが必要である。従って、第６の機能としては、分析用ターゲットの他に短波長用と長波長用のターゲットを複数具備し、検査目的に応じてターゲットを切替可能とするターゲット切替機能である。

#### SUMMARY OF THE INVENTION

本発明は上述のような事情から成されたものであり、本発明の目的は、ナノテクノロジーの分野に大きく貢献することができるX線顕微検査装置を提供することにある。詳しくは、超高分解能で且つ非常に短時間で非破壊検査が可能であると共に、高精度の電子プローブ制御機能、CT機能、元素分析機能、ターゲット切替機能などの優れた機能を搭載したX線顕微検査装置を提供することにある。

本発明は、電子源からの電子線をX線発生用ターゲットに当ててX線を発生させるX線発生手段を有し、前記X線を利用して被検査体を検査するX線顕微検査装置に関するものであり、本発明の上記目的は、電子銃の電子発生部の近傍に磁界発生部が配置された磁界重畳レンズと、前

記 X 線発生用ターゲットの上方に検出部が配置され、前記磁界重畳レンズを介して形成された電子プローブの前記 X 線発生用ターゲットからの反射電子を検出する反射電子検出手段と、前記反射電子検出手段の検出信号に基づいて前記 X 線発生用ターゲットのターゲット面の電子像を画像化する電子像生成手段とを備え、前記電子プローブの前記 X 線発生用ターゲットに対するピント調整、非点収差補正を含む調整を前記電子像の画像情報に基づいて行い得るように構成することによって達成される。

また、本発明は、電子銃の電子発生部の近傍に磁界発生部が配置された磁界重畳レンズと、前記磁界重畳レンズを介して形成される電子プローブを前記 X 線発生用ターゲットの面上で自在に振るための走査コイルとを備えることによって達成される。また、電子銃の電子発生部の近傍に磁界発生部が配置された磁界重畳レンズと、前記電子源から発生する電子の発生部近傍に配置され、前記磁界重畳レンズを介して前記 X 線発生用ターゲットに当てる電子線の軸を電子の加速前に合わせる電子線軸合わせコイルとを備えることによって達成される。また、電子銃の電子発生部の近傍に磁界発生部が配置された磁界重畳レンズと、前記磁界重畳レンズを介して集束された電子線を電子プローブとして磁場の制御により前記 X 線発生用ターゲット上を所定の経路に沿って走査する電子プローブ制御手段と、前記走査に応じて得られた前記被検査体の透過 X 線の検出データに基づき、前記被検査体の異なる断面に係る複数枚の画像を処理して前記被検査体の当該断層の微細構造を表示可能にする X 線断層画像生成手段とを備えることによって達成される。

また、本発明は、電子銃の電子発生部の近傍に磁界発生部が配置された磁界重畳レンズと、前記被検査体の上方で且つ前記 X 線発生用ターゲットから発生する X 線の領域外に検出部が配置され前記被検査体から

発生する蛍光 X 線を検出する蛍光 X 線検出手段と、前記蛍光 X 線検出手段からの蛍光 X 線検出信号及び各元素を特定するための設定値に基づいて前記被検査体の元素を分析する元素分析手段とを備えることよって達成される。また、電子銃の電子発生部の近傍に磁界発生部が配置された磁界重畳レンズと、異なる波長の X 線を発生する複数の X 線発生用ターゲットとを具備し、検査目的に応じて前記 X 線発生用ターゲットを切替えて当該波長の特性 X 線を発生できるように構成することよって達成される。

#### BRIEF DESCRIPTION OF THE DRAWINGS

図 1 は、従来の X 線検査装置の構成の一例を示す概略図であり、図 2 は、従来の F E 電子銃の構成例を示す模式図であり、図 3 は、本発明に係る本発明に係る X 線顕微検査装置の基本構成の一例を示す概略図であり、図 4 は、本発明に係る磁界レンズ重畳電子銃の第 1 の構成例を示す模式図であり、図 5 は、本発明に係る磁界レンズ重畳電子銃の第 2 の構成例を示す模式図であり、図 6 は、本発明に係る多機能を有する X 線顕微検査装置の構成の一例を示す模式図であり、図 7 は、本発明における C T 機能を説明するための模式図であり、図 8 は、走査コイルの構成例を示す模式図であり、図 9 は、電子プローブを自由に振るための走査コイルの制御方式を説明するための図であり、図 10 は、本発明におけるターゲット切替機能を説明するための図である。

#### DESCRIPTION OF THE PREFERRED EMBODIMENTS

先ず、本発明に係るX線顕微検査装置の基本構成について説明する。  
本発明では、以下に説明する磁界重畳レンズを有するX線顕微検査装置の構成に、後述する電子像による焦点調整機能、電子プローブ制御機能、電子線軸合わせ機能、CT機能、元素分析機能、ターゲット切替機能などの多機能を実現するための手段を付加した装置構成としている。

図3は、本発明に係るX線顕微検査装置の基本構成の一例を示しており、X線発生手段は、電子銃1、対物レンズ2、ターゲット3等から成り、電子銃1は、ショットキーモジュール1a、電子源1b、アノード1c等から構成される。

本実施の形態では、X線顕微検査装置の電子銃1の電子発生部の近傍に、X線顕微鏡では使われたことのない磁界重畳レンズ1dを配置し、少なくとも電子発生部1aから電子加速手段の構成要素であるアノード1cに至るまで、電子銃が作る電界に磁界重畳レンズ1dが作る磁界を重畳させて、電子Reをアノード1cで加速しながら集束させる構成としている。すなわち、電子発生部1aから発生した直後の電子Reを集束させながら加速することによって集束電子線の損失電子線量を減らしている。そして、高電流密度を有する集束電子線（X線発生用電子プローブ）をターゲット3に当て、ターゲット3から発生するX線量を増加させるようにしている。

いわゆる磁界重畳レンズは、従来より透過電子顕微鏡や走査電子顕微鏡等の電子線装置においては使用されているが、これらの電子線装置では、電子線のスポット径は小さいが、放射電流量が少ないためターゲット3から所望のX線量が得られず、X線顕微検査装置には適用できなかった。その理由は、電子顕微鏡では放射電流量はかなり小さくても信



号量として充分でそれ程問題とならないが、X線顕微検査装置では、電子顕微鏡と違い、少ないプローブ電流では、像が暗く、長い露光時間を要するという問題が発生するからである。特に、露光時間が短いというのが産業用に普及するための必要条件である。また、電子顕微鏡等の電子線装置では、超高真空が求められる電子銃室内に磁気回路等を組込む構成としている。より大電子流（プローブ電流）を必要とするX線顕微検査装置では、電子流が当たって放出するガスと発熱を伴う磁気回路による真空の劣化を解決するのが困難であった。そのため、電子線装置で使用されているものをX線検査装置に適用したものはなく、従来のX線検査装置では、アノードで加速した電子線をレンズで曲げて集束させるようにしていた。本発明に係るX線顕微検査装置では、ガス放出量が少ないとされている材料の採用と磁気回路を真空的に分離し、かつ水冷することでこの問題を解決している。

ここで、本発明に係るX線検査装置独特の磁界重畳レンズの構成について、走査電子顕微鏡装置等の電子線装置で使用されているものと比較して説明する。

FE（電界放射）電子銃は、輝度が高く且つ干渉性の良い電子線が得られることから、透過電子顕微鏡、走査電子顕微鏡、走査透過型電子顕微鏡、あるいは電子線露光装置などで威力を発揮している。しかし、この性能は、光源のクロスオーバを著しく小さく縮小して得られる。いわゆる電子線プローブもナノメートルサイズ以下（サブナノメートル）のプローブとした時に初めて十分な性能を発揮している。しかし、光源のクロスオーバをサブミクロンからミクロンサイズと拡大したプローブを得ようとする、拡大レンズの大きな収差によって十分なプローブ電流を得ることは困難となる。この収差は電子銃の光源の位置から拡大レンズ

(1 段又は複数段) の初段までの距離に関係し、距離の 3 - 4 乗に比例する。そのため電子銃部に電子レンズを付加した、いわゆる複合レンズが考案され、一部で実用化されている。

しかし、従来の F E 電子銃は、図 2 の構成例に示すように、電子銃室の筐体は全体がステンレスなどの真空シール材 1 B で形成されており、その超高真空内に配置された電子銃先端部 1 A に独立した磁気回路 1 d<sub>1</sub> (磁性体 1 d<sub>11</sub>, 励磁コイル 1 d<sub>12</sub> 等) を組み込んだ構成としている。このような構成では、超高真空が求められる F E 電子銃室 A 内に発熱を伴う磁気回路、冷却水、磁気コイルの組み込み、それらにつながるリード線、配管の取り出しに大きな困難が伴う。また、電子銃と電子レンズの軸合わせ機構も極めて困難である。これに対して、本発明に係る磁界重畳レンズを有する電子銃 (以下、磁界レンズ重畳電子銃と言う) は、磁気回路 1 d<sub>1</sub> 等から成る磁界重畳レンズの磁界発生部を、電子銃の電子源 (電子を発生する電子銃先端部 1 A) の近傍で且つ電子銃室とは真真空的に分離した部位に設けた構成としている。

図 4 は、本発明に係る磁界レンズ重畳電子銃の第 1 の構成例を、図 2 に示した従来の F E 電子銃の構成に対応させて示しており、1 A はエミッタ、サプレッサ、エキストラクタ等から構成される電子銃先端部、1 d<sub>1</sub> は磁気回路、1 d<sub>11</sub> は磁気回路を構成する磁性体、1 d<sub>12</sub> は、磁気回路 1 d<sub>1</sub> のための励磁コイル、s は電子レンズの二つのポールピースの間隔、b<sub>2</sub> (図 2 では "b") はポールピースの穴径をそれぞれ示している。図 4 に示すように、本実施の形態では、電子銃室そのものを磁性体 1 d<sub>11</sub> 等から成る磁気回路 1 d<sub>1</sub> の中に組み込んだ構成としている。詳しくは、磁界重畳レンズ 1 d の構成要素として、図 4 中に示すような例えば断面が矩形状で筐体の全体 (又は一部) が磁性体で覆

われた電子銃収容部を電子銃室Aとして具備し、その電子銃収容部内に電子銃が組み込まれた構成となっている。すなわち、電子銃室を構成する筐体の部位（上板、底板、外筒など筐体の一部又は全体）を磁気回路（磁界発生部）の一部又は全体とし、電子銃と電子レンズ1dとを真真空的に分離した構成としている。

この第1の構成例では、強い励磁が求められるが、物面（光源のクロスオーバー）はレンズ場中心より後方に配置されるため、収差係数（特に球面収差）を十分小さくできるという効果がある。その理由は、一般に、物面（この場合、光源のクロスオーバー）から電子レンズ下極までの距離が固定されると、ポールピースの穴径、間隔は大きい方が球面収差は小さくなるからである。なお、色収差はその限りではないが、本発明の対象として色収差は無視することができる。また、超高真空が求められる電子銃室とは構成上分離した形となるため、真空シール、冷却水、リード線の取り出しなどが容易になるという効果がある。

図5は、本発明に係る磁界レンズ重畳電子銃の第2の構成例を図4に示した第1の構成例に対応させて示しており、本実施の形態では、図5に示すように、電子銃先端部1Aと磁性体1d<sub>11</sub>とがより近接するように、例えば断面が凹状に形成された磁性体1d<sub>11</sub>等から成る磁界重畳レンズ1dの上部に凸状の電子銃室Aを設け、電子銃先端部1Aを磁界重畳レンズ1dの上側から磁界の中に挿入する形の構成としている。図4に示した第1の構成例では極めて強い磁界が得られるため、低加速電子線に対しては極めて有効であるが、ある程度、高加速の電子線に対しては必ずしも好都合とは言えない。そこで、小さな励磁で済むように、ポールピースの穴径b（本例では上下が異なる径サイズの穴径b<sub>1</sub>、b<sub>2</sub>）、間隔sを小さくして、その磁界の中に電子銃先端部1Aを挿入す

る形としたのが、本実施の形態である。

上記の磁界レンズ重畳電子銃の第1、第2の構成例とも、磁界重畳レンズは、磁界発生部を電子銃の電子発生部の近傍で且つ電子銃室とは分離した部位に配置した構成としており、電子銃と電子レンズとを真真空的に分離できる（焼きだしを含めて超高真空を実現しやすい）という効果と、電子銃の作る電界と電子レンズの作る磁界とを無理なく重畳できるという効果がある。また、40 nm～100 nmのナノスケールでの高分解能のX線顕微検査装置とするため、図3のX線顕微検査装置は、X線発生手段の構成要素として、上記の磁界重畳レンズ1dの他に、輝度がLaB6陰極より2桁高く、同時に実効的な電子源の大きさが3桁小さい「熱電界放射陰極」又は「液体金属電界放射陰極」を、X線顕微検査装置としては初めて用いた電子源1bを備えている。そして、液体金属を用いた電子源の場合、液体金属（低融点金属のうち融点での蒸気圧が比較的低いIn（インジウム）、Ga（ガリウム）などの金属）が電子発生部先端に供給される構成としている。

また、電子ビームによるターゲットの温度上昇を大幅に減少させ、電子線から変換されるX線が大幅に増加しても熱的負荷に耐えられるターゲットを実現するため、X線発生用ターゲット3としては、X線が透過し易く、絶縁物であるにも拘わらず熱伝導率が極めて高く、且つ融点も極めて高いダイヤモンド（CVD（chemical vapor deposition）にて形成された薄板状のダイヤモンド）をヒートシンクとして、そのダイヤモンド上にターゲット材料をCVDにより蒸着した構成の「ダイヤモンドヒートシンク付きターゲット」を備えている。

電子線集束用のレンズとしては、原理的には上述した磁界重畳レンズ1dだけで良く、図3に示したターゲット3側の電子レンズ（対物レン

ズ) 2 は必須構成ではないが、対物レンズ 2 を設けて電子線の集束を 2 段階とすることで、所望の電子プローブサイズとプローブ電流を選択する自由度が極めて大きくなる。また、従来の装置 (図 1 参照) と比較して、本発明の X 線顕微検査装置では、対物レンズ 2 の焦点距離が長く、従来の X 線顕微検査装置では得られない長い作動距離 (数 cm) を実現することができる。そのため、対物レンズ 2 とターゲット 3 との間の空間を広くとることができ、その空間内に検査に係る周辺機器を設置することが可能となる。本発明では、上記の空間内に後述する検出機器を配置し、高電流密度を有する X 線発生用電子プローブにより被検査体の微細構造を高分解能で検査できると共に、これまでにない機能を有する高性能の X 線顕微検査装置を実現している。

以下、本発明に係る各機能を搭載した X 線顕微検査装置について説明する。

本発明の X 線顕微検査装置では、[発明が解決しようとする課題] で述べた第 1 ~ 第 6 の機能、すなわち、(1) 電子像によるピント調整、非点収差補正などの焦点調整機能、(2) 電子プローブをターゲット面上で自由に振って当該 X 線により被検査体を走査可能とする電子プローブ制御機能、(3) X 線発生用ターゲットに当てる電子線の軸合わせを行う電子線軸合わせ機能、(4) 高分解能かつ高速の CT 機能、(5) 透視像の所望の部分の元素を分析する元素分析機能、(6) 検査目的に応じて目的に応じてターゲットを切替可能とするターゲット切替機能、の少なくともいずれか一つ以上の機能を付加した装置構成としている。これらの機能を実現するためには、前述した「熱電界放射陰極」又は「液体金属電界放射陰極」を用いた電子源 1 b、ダイヤモンドヒートシンク付きターゲット 3 は、構成要素としては必須ではなく、従来の L a B 6 陰極を用

いた電子源、ダイヤモンドヒートシンクを有しないターゲットであつても良いが、より高分解能の装置を実現するために、本実施の形態では上記構成要素を備えた装置構成としている。

図 6、本発明に係る多機能を有する X 線顕微検査装置の構成の一例を図 3 に対応させて示しており、図 3 の装置と同一構成箇所は同符号を付して説明を省略する。

本発明に係る X 線顕微検査装置は、前述のように、電子 R e を加速しながら集束する電子レンズ（磁界重畳レンズ）1 d を導入することにより、損失電子線量を減らしながら全体として数倍の拡大系として動作させるようにしている。このように、レンズ系が縮小系でなく拡大系で動作させるため、対物レンズ 2 の焦点距離が長く、従来の X 線顕微検査装置では得られない長い作動距離（数 c m）を実現することができる。

本実施の形態では、対物レンズ 2 とターゲット 3 との間に、偏向コイル（走査コイル）4 と反射電子検出電極 1 2 a から成る反射電子検出器 1 2 の検出部とがそれぞれ設けられている。偏向コイル 4 は、磁界重畳レンズ 1 d を介して形成される電子プローブ（電子ビーム R e）を X 線発生用ターゲット 3 の面上で自在に振るためのコイルである。本例では、図 6 中に示すように、偏向コイル 4 が対物レンズ 2 の中心側の下部に形成されている。反射電子検出電極 1 2 a は、X 線発生用ターゲット 3 からの反射電子を検出するための鏡体と絶縁された電極であり、反射電子検出器 1 2 の検出信号は、本例では分析用コンピュータ 1 5 に入力され、ターゲット面の電子像が画像化されてモニタ表示されるようになっている。

また、被検査体（試料）1 0 の上方で且つ X 線発生用ターゲット 3 から発生する X 線の領域外に、被検査体 1 0 から発生する蛍光 X 線を検出

するための蛍光 X 線検出器 13 が配置されている。蛍光 X 線検出器 13 で検出した蛍光 X 線の検出情報は、パルスハイトアナライザー 14 を介して分析用コンピュータ 15 に入力され、蛍光 X 線の検出情報及び各元素を特定するための設定値に基づいて被検査体の元素の分析処理が行われるようになっている。

上述のような構成において、本発明の X 線顕微検査装置が有する各機能について説明する。図 6 に示した X 線顕微検査装置は、電子線の軸調整を極めて容易にするために、X 線ターゲット 3 の近傍に反射電子検出器 12 が配置されており、電子プローブにより走査することによって X 線発生用ターゲット 3 の表面の電子像を画像化できるように構成されている。そして、ターゲット 3 の反射電子像が、ピント調整（電子プローブの X 線発生用ターゲットに対するピント調整）、電子プローブの非点収差補正などの調整によって、最もシャープになった時に走査を止めることで、所望の電子プローブが得られるようになっている。この方法は X 線顕微検査装置では初めての試みである。この反射電子像による調整は、例えば分析用コンピュータ 15 により画像化された画像を見ながら、対物レンズ 2 を電磁的に調整することにより行われるが、外部からの信号で制御可能な駆動機構を設けて、電子像の画像情報に基づいて自動的に調整する構成としても良い。

上記の電子プローブによる走査は、電子プローブの周囲の偏向コイル（走査コイル）を用いて行われ、X 線発生用ターゲット上を所定の経路に沿って走査するように制御する。

ところで、高分解能の X 線顕微検査装置を実現するには、試料（被検査体）10 に照射する X 線量が多く、且つ高強度で微小な焦点サイズの X 線を発生させるためには、ターゲット 3 に当てる電子線は高性能レン

ズにより集束のロスが少なく電子量が多いことが重要であるが、X線発生用の電子ビームの軸の向き及び位置も重要である。本実施の形態では、図3並びに図6に例示したように、X線顕微検査装置としては初めて、電子発生部1Aの近傍（電子源のすぐ近くに）に電子線軸合わせコイル1eを配置する構成とし、この軸合わせコイル1eにより、アノード1cで加速する前の電子線をX、Y方向にシフトして軸を合わせることで、電子ビームのX線源に対する軸合わせを正確且つ極めて容易にできるようにしている。この軸合わせは、前述のピント調整と共に、例えば分析用コンピュータ15により画像化された反射電子像の画像を見ながら行われる。

本実施の形態では、電子ビーム（X線発生用の電子プローブ）によりスキャンして、反射電子検出器12の検出信号に基づいてターゲット表面の反射電子像を観察する能力があるので、走査コイル4に流す電流を制御して、例えば図7の例のように、電子ビームReを偏向してターゲット3上で円形にスキャンするなど、電子プローブを自在に動作させる機能を付加することによって、被検査体10を回転しなくてもターゲット3上で円形に電子ビームReを振りながら多数の像Isを取り込むことができる。そのため、CT処理によって任意の断面積の観察が可能となる。この方法は、被検査体10がターゲット3に接近した高分解能を期待できる状況で極めて精度よく被検査体を回転するのと等価な状態であり、数倍高分解能・高速のCT機能が実現できる。

ここで、電子プローブの走査によるX線断層の撮像処理について説明する。本実施の形態では、磁界重畳レンズ1dを介して集束された電子線を電子プローブとして、磁場の制御によりX線発生用ターゲット3上を任意の経路に沿って走査する電子プローブ制御手段と、走査に応じて



得られた被検査体 10 の透過 X 線の検出データに基づき、被検査体 10 の異なる断面に係る複数枚の画像を処理して被検査体 10 の当該断層の微細構造を表示可能にする X 線断層画像生成手段とを備えている。これらの電子プローブの制御と画像処理は、分析用コンピュータ 15、若しくは図示されない制御回路若しくは他のコンピュータで行われる。

図 6 に示した走査コイル 4 は、例えば図 8 に示すように、X 軸方向及び Y 軸方向にそれぞれ対向して環状に配置された 4 つの円弧状のコイル 4 X a, 4 X b, 4 Y a, 4 Y b から構成される。そして、これらの走査コイル 4 に流す電流を制御して電子プローブの周囲の磁場を変える。これにより、電子プローブの位置と方向を変えることで、被検査体 10 を円形にスキャンするなど所望の方向にスキャンしてその X 線像を得る。

図 9 (A) は、電子プローブにより水平方向、垂直方向にスキャンする場合の走査コイル 4 の制御例を模式的に示している。また、同図 (B) は、円形方向にスキャンする場合の走査コイル 4 の制御例を模式的に示している。これらの図 9 (A), (B) に示すように、X 軸方向のコイル 4 X a, 4 X b、及び Y 軸方向のコイル 4 Y a, 4 Y b に流す電流量を制御することにより、電子プローブを偏向させて X 線源 23 a の位置を連続的に変えることで、被検査体 10 をスキャンしてその X 線像を得る。

次に、元素分析機能について説明する。被検査体 10 に X 線を照射すると全方位に被検査体の構成元素特有の波長をもった蛍光 X 線が発生する。これを検出できれば被検査体の元素分析が可能となる。他方、ターゲット 3 からは連続 X 線と特性 X 線が出るが、特に連続 X 線は電子の入射方向に沿って下方に照射される。そのため被検査体の下方で蛍光 X 線検出器を置いても連続 X 線がバックグラウンドになり蛍光 X 線が測定で

きない。本発明に係るX線顕微検査装置は、対物レンズ2の焦点距離が長く、前述のように従来のX線顕微検査装置では得られない長い作動距離（数cm）を実現できるため、図6に示したように、被検査体10の上方で且つX線の発生領域外（本例ではX線ターゲットの斜め上方）に蛍光X線分析用検出器13を置く空間を確保できる。

蛍光X線の検出器13としては、冷却しないで使用でき、且つ検出感度の高い

CdTe（テルル化カドミウム半導体）などを使用する。分析の部位を特定するために10～20 $\mu$ m程度のピンホールを、被検査体上面で走査して上方に出た蛍光X線を分析すると同時に、ピンホール5を通り抜けたX線でできた透視像で位置的な同定を行うことができるようにする。

蛍光X線は、1次X線がエネルギーの高い硬X線の方が発生効率が高いので、分析用ターゲットにはなるべく原子番号の大きいものを用いるのが望ましい。同時にそのターゲットからの特性X線が観察しようとする被検査体の蛍光X線と紛らわしくないものであることが必要である。また、分解能と並んで重要な像のコントラストは加速電圧とターゲット材の種類に依存する。従来のX線検査装置は、単一のターゲット材を用いており、ターゲットを変えて様々な特性X線を利用するという機構のものはなかった。

本発明ではターゲットとして従来一般的に用いられてきたW（タングステン）のほか、蛍光X線分析用や軽元素試料用を考慮して、Ti（チタン）、Cr（クロム）、Ge（ゲルマニウム）、Mo（モリブデン）、Rh（ロジウム）、Re（レニウム）、Ir（イリジウム）、Pt（白金）といった高融点金属をCVD法もしくはスパッタ法により、図10に示すように、微細な帯状に構成し、ターゲット3の直上の走査コイル

4に電子ビームを移動する機能を付加して、各々のターゲット3（本例では3a, 3a, 3c）を観察目的に合わせて、反射電子像を見ながら選択できるようにする。その結果、各々の試料に最適なコントラストをもたらすターゲット材料を容易に選べるようになる。

下記の表1は、これらのターゲット材料の原子番号、 $K\alpha$ 、 $L\alpha$ 線の波長、融点を示している。この表1からあまり観察用試料に使われない材料という観点から、分析用ターゲットとしては“Rh”が適していることが判る。

[表1]

元素名	原子番号	$K\alpha$ (Å)	$L\alpha$ (Å)	融点(°C)
Ti	22	2.75	27.4	1725
Cr	24	2.29	21.6	1857
Ge	32	1.26	10.5	937
Mo	42	0.71	5.41	2617
Rh	45	0.62	4.60	1966
W	74	0.21	1.47	3407
Re	75	0.20	1.43	3180
Ir	77	0.19	1.35	2410
Pt	78	0.19	1.31	1772

なお、上述した実施の形態においては、全ての機能を搭載したX線顕微検査装置を例として説明したが、個々の機能を独立して搭載することができる。

以上に説明したように、本発明によれば、高電流密度を有するX線発生用電子プローブにより被検査体の微細構造を高分解能で検査できると共に、これまでにない高性能の機能を有するX線顕微検査装置を提供することが可能となる。詳しくは、電子プローブのX線発生用ターゲットに対するピント調整、非点収差補正を含む調整を画像を見ながら容易に

行うことが可能となる。また、走査コイルにより電子プローブを自在に制御することができるので、被検査体を回転などさせることなく、所望の部位を検査することが可能となる。また、電子線の軸を電子の加速前に合わせる機能を備えているので、高電流密度を有するX線発生用電子プローブの軸合わせを正確且つ極めて容易に行うことができる。

また、高分解能かつ高速のCT機能を備えているので、次世代超LSI等の検査など、ナノスケールでの非破壊検査を高精度で行うことが可能となる。また、ターゲットから発生するX線の影響を受けることなく、被検査体から発生する蛍光X線を検出して被検査体の元素を高精度で分析することができる。また、X線発生用ターゲットを手動で交換することなく、検査目的に応じて自在に切替えることができるので、コントラストの付き方を変えて観察をするなど、波長の異なる複数のX線による検査が容易に行えるようになる。

ところで、近年、半導体部品を筆頭にその構成最小単位はマイクロスケールからナノスケールへ微細化が進んでいる。そうした部品の内部の微細構造を非破壊で検査し、特性X線を利用して被検査体ごとに最適なコントラストを実現し、微小部位の元素分析するということは今後、必要不可欠な技術になってくる。こうした内部構造を非破壊かつ高分解能で観察および分析できる手段は、今のところX線しかない。よって本発明により、ナノテクノロジーの分野に大きく貢献することができる。

#### <参考文献一覧>

非特許文献1:

ニクソン (Nixon) 著, 「ハイ-リゾリューション エックス-レイ プロジェクション マイクロスコーピィ (High-resolution X-ray

projection microscopy) 」 , 1960年, A232 : p. 475 - 485

非特許文献2 :

矢田 慶治・石川 寿, 「SEMを利用した透過型X線陰影顕微鏡」,  
東北大学科学計測研究所報告, 1980年, 第29巻 第1号 p.  
25 - 42

非特許文献3 :

矢田慶治・篠原邦夫, 「軟X線顕微鏡の発達」, 1980年, 生物物理  
Vol. 33 No. 4 p. 8 - 16

非特許文献4 :

ケイジ ヤダ (Keiji Yada) ・ショウイチ タカハシ (Shoichi  
Takahashi) , 「ハイ-リゾリューション プロジェクション エックス-レ  
イ マイクロスコピー (High-Resolution Projection X-ray  
Microscopy) 」 , 1994年, Chap. 8 p133 - 150

非特許文献5 :

矢田慶治・篠原邦夫, 「投影X線顕微鏡の開発と生物学への応用」,  
1996年, 青森公立大学紀要 第1巻 p. 2 - 13

#### WHAT IS CLAIMED IS:

1. 電子源からの電子線をX線発生用ターゲットに当ててX線を発生させるX線発生手段を有し、前記X線を利用して被検査体を検査するX線顕微検査装置において、電子銃の電子発生部の近傍に磁界発生部が配置された磁界重畳レンズと、前記X線発生用ターゲットの上方に検出部が配置され、前記磁界重畳レンズを介して形成された電子プローブの前記X線発生用ターゲットからの反射電子を検出する反射電子検出手段と、前記反射電子検出手段の検出信号に基づいて前記X線発生用ターゲットのターゲット面の電子像を画像化する電子像生成手段とを備え、前記電子プローブの前記X線発生用ターゲットに対するピント調整、非点収差補正を含む調整を前記電子像の画像情報に基づいて行い得るように構成したことを特徴とするX線顕微検査装置。

2. 電子源からの電子線をX線発生用ターゲットに当ててX線を発生させるX線発生手段を有し、前記X線を利用して被検査体を検査するX線顕微検査装置において、電子銃の電子発生部の近傍に磁界発生部が配置された磁界重畳レンズと、前記磁界重畳レンズを介して形成される電子プローブを前記X線発生用ターゲットの面上で自在に振るための走査コイルとを備えたことを特徴とするX線顕微検査装置。

3. 電子源からの電子線をX線発生用ターゲットに当ててX線を発生させるX線発生手段を有し、前記X線を利用して被検査体を検査するX線顕微検査装置において、電子銃の電子発生部の近傍に磁界発生部が配置された磁界重畳レンズと、前記電子源から発生する電子の発生部近傍に配置され、前記磁界重畳レンズを介して前記X線発生用ターゲットに

当てる電子線の軸を電子の加速前に合わせる電子線軸合わせコイルとを備えたことを特徴とするX線顕微検査装置。

4. 電子源からの電子線をX線発生用ターゲットに当ててX線を発生させるX線発生手段を有し、前記X線を利用して被検査体を検査するX線顕微検査装置において、電子銃の電子発生部の近傍に磁界発生部が配置された磁界重畳レンズと、前記磁界重畳レンズを介して集束された電子線を電子プローブとして磁場の制御により前記X線発生用ターゲット上を所定の経路に沿って走査する電子プローブ制御手段と、前記走査に応じて得られた前記被検査体の透過X線の検出データに基づき、前記被検査体の異なる断面に係る複数枚の画像を処理して前記被検査体の当該断層の微細構造を表示可能にするX線断層画像生成手段とを備えたことを特徴とするX線顕微検査装置。

5. 電子源からの電子線をX線発生用ターゲットに当ててX線を発生させるX線発生手段を有し、前記X線を利用して被検査体を検査するX線顕微検査装置において、電子銃の電子発生部の近傍に磁界発生部が配置された磁界重畳レンズと、前記被検査体の上方で且つ前記X線発生用ターゲットから発生するX線の領域外に検出部が配置され前記被検査体から発生する蛍光X線を検出する蛍光X線検出手段と、前記蛍光X線検出手段からの蛍光X線検出信号及び各元素を特定するための設定値に基づいて前記被検査体の元素を分析する元素分析手段とを備えたことを特徴とするX線顕微検査装置。

6. 電子源からの電子線をX線発生用ターゲットに当ててX線を発生

させるX線発生手段を有し、前記X線を利用して被検査体を検査するX線顕微検査装置において、電子銃の電子発生部の近傍に磁界発生部が配置された磁界重畳レンズと、異なる波長のX線を発生する複数のX線発生用ターゲットとを具備し、検査目的に応じて前記X線発生用ターゲットを切替えて当該波長の特性X線を発生できるように構成したことを特徴とするX線顕微検査装置。



## ABSTRACT OF THE DISCLOSURE

超高分解能で且つ非常に短時間での非破壊検査が可能であると共に、高精度の電子プローブ制御機能、C T機能、元素分析機能、ターゲット切替機能などの優れた機能を搭載したX線顕微検査装置を提供する。

電子発生部の近傍に磁界発生部が配置された磁界重畳レンズと、X線発生用ターゲットの近傍に配置され、前記磁界重畳レンズを介して形成された電子プローブの前記X線発生用ターゲットからの反射電子を検出する反射電子検出手段と、前記反射電子検出手段の検出信号に基づいて前記X線発生用ターゲットのターゲット面の電子像を画像化する電子像生成手段とを備え、前記電子プローブの前記X線発生用ターゲットに対するピント調整、非点収差補正を含む調整を前記電子像の画像情報に基づいて行い得るように構成する。更に、電子プローブ制御機能、電子線軸合わせ機能、C T機能、元素分析機能、ターゲット切替機能などの機能を搭載する。